



**HAL**  
open science

## Conception complexe et ingénierie système.

Eric Bonjour, Samuel Deniaud, Jean-Pierre Micaëlli

► **To cite this version:**

Eric Bonjour, Samuel Deniaud, Jean-Pierre Micaëlli. Conception complexe et ingénierie système.. HERMES Science. Les systèmes techniques. Lois d'évolution et méthodologies de conception., Lavoisier, pp.83-101, 2009, IC2. hal-00433926

**HAL Id: hal-00433926**

**<https://hal.science/hal-00433926>**

Submitted on 25 Nov 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chapitre 4, rédigé par Eric Bonjour, Samuel Deniaud, Jean-Pierre Micaëlli

## Conception complexe et ingénierie système

### 6.1 Introduction

S'il est une tendance admise en matière de dynamique technique de longue période, c'est bien celle de la complication croissante des « objets techniques » [SIM 58] voulus, conçus, produits et utilisés par l'Homme. Pour s'en convaincre, il suffit de procéder à une comparaison facile et de mettre en rapport une plaque de métal - objet banal du XIX<sup>e</sup> siècle - avec un téléphone portable - objet banal de notre époque - de même dimension et masse. Il ne fait alors aucun doute que celui-ci répond à plus nombreuses fonctions que celle-là. Il permet en effet de communiquer des messages par la voix, l'écrit ou l'image, de photographier, de filmer, de jouer, d'avoir l'heure, de gérer ses rendez-vous, etc., si bien, d'ailleurs, que sa compréhension par l'utilisateur relève de plus en plus du *pensum* [MOR 07]. Pour assurer toutes ses fonctions, il intègre de nombreux composants, matériels et logiciels, relevant, qui plus est, de domaines techniques et scientifiques éloignés : télécommunications, électronique, énergie, traitement du signal, logiciel enfoui et interface homme-machine, etc. Du fait de cette densité fonctionnelle particulièrement élevée, il ne peut donc pas se comprendre comme un simple composant, mais comme une véritable architecture multiphysique. Il exhibe aussi différents comportements : il répond aux commandes venant de l'utilisateur lorsque celui-ci appuie sur ses touches ou effleure son écran, il cherche les émetteurs les plus proches, il vérifie l'état de la batterie, il vibre ou sonne, etc. Enfin, il est à la fois

## 2 Lois d'évolution des systèmes techniques et méthodologies de conception

produit en masse et varié, ce qui suppose un système de production et une chaîne logistique particulièrement compliqués.

En faisant de tels constats, il paraît indubitable que la conception du téléphone portable actuel ne peut être artisanale [STA 00, PER 01, MIC 03] ou relever du simple bricolage, fût-il habile ou astucieux. Passé un certain niveau de complication fonctionnelle, organique [MOL 72], comportementale ou fabricatoire, les modalités de conception changent. Celle-ci se doit d'être à la fois abstraite et complexe. Abstraite, car, ne pouvant d'emblée cerner tous les détails et toutes les formes pris par l'objet technique concret, elle doit se tourner vers un « objet abstrait » [SIM 58] que les promoteurs de l'ingénierie système (syn. ingénierie de systèmes) appellent un « système-produit » [AFI 04]. Il s'agit, pour reprendre notre exemple, du système téléphone portable, ou ce qui est synonyme, d'un téléphone portable idéal. Toute forme concrète prise par cet objet abstrait sera vue comme une occurrence, comme une « solution » [AFI 04] (par exemple, tel modèle de téléphone portable). Complexe, car la conception du système-produit suppose le maillage et le recouvrement non-trivial entre les attentes et les exigences de différentes parties prenantes (utilisateurs du système téléphone portable, opérateurs, fabricant, recycleur, etc.), entre les fonctions (communiquer en toutes circonstances, mais économiser l'énergie), les comportements (l'affichage et la sonnerie), les organes (la compatibilité électromagnétique entre composants très proches), ou encore entre les vues, les compétences et les connaissances des acteurs de conception (spécialiste de réseau, électronicien, informaticien, électricien, spécialiste de *form design*, de marketing, chiffreur, fabricant, etc.) [MIC 03]. Pour les théoriciens ou praticiens de l'ingénierie système, ce maillage et ce recouvrement doivent être organisés, principalement dans le cadre d'une structure appelée processus de conception.

Pour résumé, l'ingénierie système entend apporter un cadre de référence utile pour comprendre et mettre en œuvre la conception complexe de produits compliqués. Ce chapitre donnera un aperçu de cette forme d'ingénierie. Après en avoir proposé une définition, il en détaillera deux aspects. Le premier concernera le système-produit lui-même. Seront ainsi présentés des concepts comme ceux de partie prenante, d'exigence, de contexte opérationnel, de fonction, de comportement, d'architecture, de solution, de famille, de lignée, etc. Nous nous focaliserons ensuite sur le versant de l'ingénierie système qui s'intéresse à la conception complexe. Ce seront alors les concepts de processus génériques, spécifiques ou particuliers, de projet, de capacité de processus, d'équipe pluridisciplinaire, de communauté d'activité, etc., qui seront présentés. Tous les concepts évoqués ne seront pas simplement listés, mais agencés et reliés entre eux, en fin de chapitre, en une totalité cohérente appelée « ontologie » [GRU 95].

## 6.2. L'ingénierie système, une définition

L'ingénierie système est une approche de la conception bientôt quinquagénaire. Elle est née aux États-Unis dans le secteur militaire dans les années 1960, pour gérer des appels d'offres passés par le Département d'État de la Défense (DOD) et les projets de développement de solutions afférents. Elle s'est ensuite diffusée dans l'armement, l'aéronautique [YAN 08], l'astronautique, l'électronique, le logiciel, avant de toucher, à la fin des années 1990, la plupart des secteurs industriels : l'automobile [YAN 08], l'électroménager, les biosystèmes [TES 07], l'instrumentation scientifique [CHI 07], etc. De nos jours, l'ingénierie système s'appuie sur différentes normes sectorielles ou générales, à savoir les standards MIL STD 499, EIA-ANSI 632, VDI 2222, ISO 15288, etc. Elle donne lieu à la constitution de communautés épistémiques ou de pratiques [CEF 05] animées par des industriels, comme l'INCOSE (*International Committee on Systems Engineering*) au niveau international, ou, en France, l'AFIS (Association Française d'Ingénierie Système) [AFI 04].

Au-delà de la diversité de ses applications et ses normes, l'ingénierie système présente une unité conceptuelle certaine. Ainsi, sa dénomination même combine deux mots abstraits, qui sont ceux d'ingénierie et de système.

Le premier peut être pris au sens de démarche structurée de l'ensemble des activités de conception qui contribuent au développement d'un objet technique présentant le plus souvent un réel degré de complication. Cet objet peut être un bien unitaire répondant à des exigences techniques élevées, comme dans le cas d'un réacteur thermonucléaire expérimental [CHI 07]. Il peut s'agir d'un bien produit en masse, comme dans le cas d'un téléphone portable évoqué en introduction. Les exigences de fabrication et les exigences économiques seront alors particulièrement aigües.

Quant au mot de système, il désigne non l'objet concret développé suite à tel ou tel projet particulier, mais un objet abstrait, un idéal, appelé le système-produit. Tout objet concret, ou solution, qui en dérive sera vue comme une occurrence, appelée par le normalisateur une « solution » [ISO 02].

Pour le dire autrement, l'ingénierie système propose une vue générique de l'objet conçu (le système-produit) et de son processus de conception, dont on suppose qu'il présente une réelle complexité. Cette genericité revendiquée fait que, pour le théoricien ou le praticien de l'ingénierie système, il est possible d'appréhender la conception du système-produit sans s'intéresser :

#### 4 Lois d'évolution des systèmes techniques et méthodologies de conception

- à ses formes détaillées, c'est-à-dire, si nous prenons l'exemple dans le cas de la conception d'un bien mécanique, sans disposer du descriptif complet de sa géométrie ou de la nomenclature complète de ses composants ;

- à une solution individuelle ou particulière, comme dans le cas de tel modèle de voiture développé à tel moment et produit, avec toutes ses variantes et options, pour tel client individuel ;

- à une solution spécifique, comme dans le cas d'une gamme de produits (l'ensemble des modèles automobiles qui peuvent être potentiellement développés à un même moment, en partant d'une même famille) ou d'une lignée (l'ensemble des modèles automobiles chronologiquement interdépendants, et qui peuvent être offerts sur une période correspond à la durée de vie de la lignée) ;

- aux facteurs contingents utiles pour comprendre les singularités de contexte ou de déroulement du projet de conception particulier dont la solution est l'aboutissement.

En appréhendant le système-produit et son processus de conception de façon générique, un double gain peut être retiré. Un gain épistémique, d'abord. La connaissance générique permet d'en avoir une vue plus globale, ce qui rend cohérent de multiples choses qui, sans elle, paraîtraient disjointes. Un gain pratique, ensuite. Cette même connaissance générique permet de penser chaque solution et chaque processus concret comme une réplique, une instanciation ou une variante d'un modèle abstrait. Ce qui a pour conséquence d'abaisser le coût de développement de solutions ou celui des projets concrets, et d'obtenir ainsi des économies d'échelle significatives. Bien sûr, ces gains épistémiques et pratiques ne peuvent être obtenus que si le système-produit et le processus de conception générique associé sont correctement définis. Aussi, pour ce faire, les promoteurs de l'ingénierie système proposent une palette de concepts aussi bien formulés que possible. Dans le cadre de ce chapitre, nous les classerons en prenant en compte les deux aspects de cette ingénierie : un aspect objectif, relatif au système-produit, et un aspect processuel, lié à sa conception complexe.

### 6.3 L'artefact, cible de l'ingénierie système

L'ingénierie système se focalise sur un système spécifique, qui est le système conçu par l'Homme pour satisfaire ses besoins [BON 06], ou ce que Herbert SIMON (1916-2001) appelait un « artefact » [SIM 97]. Un tel système peut donc être aussi qualifié d'artificiel, de fonctionnel, de socio-technique, etc. Il hérite des propriétés de tout système, à savoir qu'il est caractérisé par un environnement externe, par une structure interne et, à l'interface entre les deux, par un comportement [SIM 97]. Ces caractéristiques se déclinent bien évidemment de façon spécifique.

Le système-produit ciblé par l'ingénierie système n'est pas un isolat sans aucun rapport avec son environnement externe, direct et indirect. Il assure des fonctions (il est fait pour...), interopère avec des systèmes extérieurs via des interfaces et s'intègre dans un milieu naturel. Pour le dire autrement, il offre des services à différentes parties prenantes qui ont des attentes ou formulent des exigences à son égard : l'utilisateur, le client, le fabricant, le maintenancier, le recycleur, etc. Il interopère, de façon coopérative ou non, avec des systèmes tiers. Certains peuvent même être qualifiés de systèmes contributeurs, si leur concours est utile au bon fonctionnement du système étudié. Pour un système étudié comme l'automobile, relèvent des systèmes contributeurs : le système de production automobile, le réseau routier, de distribution de carburants ou de garagistes, les institutions comme les sociétés d'assurance, le code de la route, les outils de régulation comme la signalisation, les radars, etc.. Enfin, le système étudié devant être concrétisé dans des solutions, il s'inscrit de ce fait dans l'environnement naturel. Ce qui signifie qu'il occupe un espace, qu'il consomme de l'énergie, des matières, et de ce fait modifie la quantité et la qualité des ressources environnementales disponibles.

Appréhender le système-produit du seul point de vue externe ne suffit pas dans l'optique de l'ingénierie système. Le concepteur agit non seulement sur les interfaces, l'enveloppe du système étudié, mais aussi sur sa structure interne, sur son « architecture » [MEI 98]. Cette architecture ne ressemble pas à un appariement d'atomes au sein d'une molécule. Elle est le plus souvent composée de modules — groupements de composants distincts, qu'ils soient abstraits (fonctions) ou concrets (organes) — et d'éléments intégrateurs [SOS 03] qui assurent le bon agencement et la bonne coordination de l'ensemble. Ces derniers peuvent prendre la forme d'un socle sur lequel viennent se connecter les composants [ULR 00], d'une enveloppe (par exemple un bloc moteur pour les pistons, les bielles, le vilebrequin, etc.), d'un réseau, d'une liaison, d'un standard d'interface (par exemple XML, en informatique) ou de connection (normes électriques), de services supports, etc. Ainsi, du point de vue architectural, une automobile actuelle comprend pour modules un groupe motopropulseur, une liaison au sol, des coffres, un habitacle, et pour éléments intégrateurs une caisse ou un réseau électrique.

L'architecture du système-produit n'est pas donnée, mais construite par le concepteur. Pareille construction peut être vue comme une nécessité, dans la mesure où ce modèle de la structure interne du système-produit allège sa charge mentale. Le concepteur cherche ainsi à décomposer la structure interne du système en modules le plus disjoints possible, de sorte à traiter indépendamment les problèmes que posent leur compréhension, leur modélisation, leur développement et leur test respectifs [ULR 95]. Si, mis bout à bout, ces modules sont nombreux, le concepteur peut chercher à les hiérarchiser [SIM 97] et à les répartir en strates de niveaux de détail

ou de concrétude croissants [YAN 08, BON 06]. Son effort de conception se portera sur ces strates successives. Les problèmes globaux — par exemple, la définition des exigences valables pour tout le système-produit — seront traités avant les problèmes détaillés — le développement des composants propres à tel ou tel module. Une telle modularisation et stratification a une contrepartie, qui est l'exigence, pour le concepteur, d'avoir à synthétiser les solutions localement obtenues. Il lui revient alors de tester chaque module, d'intégrer l'ensemble de l'architecture, et de vérifier que la solution globale est conforme aux exigences exprimées par les parties prenantes en amont de la conception, notamment l'utilisateur ou le client de la solution.

Enfin, le système-produit exhibe un comportement fonctionnel et dynamique. Il fonctionne — bien, pas ou en mode dégradé — dans différents contextes opérationnels : démarrage, cycle urbain, route, autoroute, garage, à vide, en surcharge, de jour, de nuit, etc., pour un véhicule automobile. Le système-produit se transforme aussi à mesure qu'il franchit les phases de son cycle de vie. Si nous nous focalisons sur la phase d'utilisation de l'automobile, nous voyons bien que celle-ci vieillit, si bien que, par exemple, des pièces d'usure doivent être changées dans les délais impartis, ou des paramètres du système de contrôle-commande du moteur recalculés.

Définir l'ingénierie système par son seul objet, à savoir le système étudié, ne suffit pas. Pour en donner un aperçu global, il convient de préciser quelle vision et quelle théorie de la conception en ont ses promoteurs.

## **6.4 La conception complexe, modalité de l'ingénierie système**

### **6.4.1 *La conception comme combinaison de processus***

Il existe de très nombreuses façons de conceptualiser, de théoriser ou de modéliser la conception [PER 01]. Les spécialistes de l'ingénierie système la voit d'une façon « mésoscopique » [MIC 03], non comme l'exercice brillant de quelque esprit créatif, mais comme un ensemble de processus méthodiquement mis en œuvre au sein d'une structure professionnelle dédiée à la conception. Cette structure peut être intégrée, comme dans le cas d'un bureau d'études réalisant seul tous les développements de toutes les solutions. Elle peut être quasi-intégrée, si cette structure se présente sous forme d'un réseau liant le bureau d'études d'un architecte intégrateur avec ses équipementiers ou ses prestataires de service. Du fait de la complication croissante des objets techniques et de la volonté stratégique des entreprises de se concentrer sur leur cœur de métier, cette forme tend à devenir un

standard. Dans tous les cas — conception intégrée ou résiliaire (syn. quasi-intégrée), l'entité organisationnelle qui importe, pour l'ingénierie système, c'est le processus.

Mentionner le terme de processus pose une première question, qui concerne la définition de cette entité organisationnelle. Depuis les années 1990, en effet, de multiples travaux, tant en théorie des organisations, qu'en management de la qualité (voir le référentiel ISO 9000) ou qu'en architecture des systèmes d'information d'organisation ont été réalisés à son sujet. La norme ISO 15288 dédiée à l'ingénierie système en reprend une définition a *minima*, tirée de l'ISO 9000, comme « ensemble d'activités interreliées ou interagissant qui transforment des entrées en sorties ». Une définition enrichie peut, selon nous, être tirée de l'esprit de l'ingénierie système. Cette définition présente le processus comme un système artificiel mis en place pour donner un sens à l'activité d'un collectif d'acteurs impliqué de près ou de loin dans une conception donnée. En tant que système, deux points de vue peuvent être portés sur lui :

- d'un point de vue externe, le processus intègre un ensemble d'activités contribuant à la production d'un service global, qui a une certaine valeur pour le client. Ainsi, un service conforme, produit en temps utile, aura une grande valeur ;

- d'un point de vue interne, le processus se veut une cartographie des interdépendances spatiales et temporelles entre des activités. Celles-ci peuvent être caractérisées par le type de transformation de données d'entrées en résultats attendus assuré, des acteurs qu'elles mobilisent, des ressources qu'elles consomment, dont le temps, et des dépenses qu'elles génèrent. Du point de vue interne, se pose la question de l'efficacité opérationnelle du processus, c'est-à-dire de la bonne gestion des ressources allouées, et ce, tant au niveau des activités qu'à celui des supports et procédures intégrateurs qui en assure la coordination intertemporelle.

Du point de vue de l'évaluation de performance du processus, ces deux vues, externe et interne, fusionnent en un même « évaluant » (syn. objectif, indicateur, critère) mettant en relation la valeur du service produit avec son efficacité opérationnelle, donc son coût [MIC 07]. À suivre les promoteurs de l'approche CMM (*Capability Maturity Model*) ou CMMI (*Capability Maturity Model+Integration*) [CAR 06], cet évaluant peut être exprimé en termes de niveau de capacité du processus évalué, c'est-à-dire de sa capacité à garantir la valeur de service et son efficacité opérationnelle.

L'ingénierie complète sa théorie du processus en identifiant différents niveaux de genericité quant à son appréhension. Celui-ci peut être :

- un processus « générique » [BON 06], s'il s'agit d'un processus normalisé par l'ingénierie système, c'est-à-dire d'un processus requis pour développer le système-produit. Le normalisateur en propose une typologie, selon qu'il relève du processus



d'affaire, du processus de management, du processus support ou du processus technique. Ce dernier est le plus connu. Il comprend le cœur des activités du concepteur, par exemple décrites à l'aide du cycle en V : exprimer les besoins, spécifier les exigences, architecturer le système, développer ses modules i.e. le réaliser, les intégrer, vérifier, puis valider l'ensemble ainsi obtenu [YAN 08, BON 06]. Ces processus génériques types font l'objet d'une cartographie pérenne, par exemple inscrite dans le système qualité ou dans le système d'information de l'organisation qui met en œuvre l'ingénierie système. Dans le cas de l'automobile et du développement du système-produit appelé groupe motopropulseur, il pourra s'agir des processus associés au développement de plate-formes [BON 06] ;

– un processus « spécifique » [BON 06]. Ce processus est plus local et moins pérenne que le précédent, puisqu'il est propre à une famille ou une lignée de solutions, par exemple le moteur Diesel, le moteur essence, les motorisations hybrides ;

– un processus « particulier » [BON 06], « unique » [ISO 05] ou « ajusté » [MEI 98], s'il correspond au processus associé à un projet de conception d'une solution individuelle, par exemple le moteur Diesel qui sera intégré dans telle génération de tel modèle du constructeur automobile.

Soulignons que, dans le modèle d'organisation matricielle proposée par WHEELWRIGHT et CLARK [WHE 92], l'identification, la modélisation et la gestion du processus particulier relève d'une logique de projet, alors que les deux autres (processus générique et spécifique) relèvent d'une logique de métier. Cela ne signifie pas que les métiers existent sans réaliser la moindre activité, c'est-à-dire sans concevoir des objets, mais qu'ils développent des objets abstraits présentés sur étagère aux concepteurs et managers en charge du développement d'une solution particulière. À eux de les ajuster, de les adapter, de les particulariser ou d'en proposer des variantes.

#### **6.4.2 Le rôle des équipes et des communautés**

Si l'ingénierie système actuelle propose une vision riche du processus de conception, il manque toutefois une analyse tout aussi approfondie des collectifs impliqués dans la conception complexe. Force est de constater qu'existe même un hiatus entre la définition standard de l'ingénierie système, qui met en exergue le caractère interdisciplinaire et collaboratif d'une telle conception, et l'absence d'entités collectives correspondantes. Or, plus les acteurs impliqués dans les processus ont des points de vue, des compétences, des façons de faire, des connaissances différentes et éloignées, plus la structuration et la réalisation du processus sera complexe. Il convient alors d'identifier les entités collectives qui

assurent leur maillage, leur recouvrement, ainsi que la constitution de connaissances communes. Pour cela, au moins deux entités nous paraissent devoir être retenues, à savoir l'équipe et la communauté.

Au niveau « microscopique » [MIC 03], la première de ces entités est appelée équipe, et plus spécifiquement équipe pluridisciplinaire. Elle regroupe des concepteurs individuels, qu'on suppose être des professionnels ou des experts d'un domaine, qui coordonnent de façon synchrone leurs « plans d'action » [BON 06], pour développer un module ou un élément intégrateur [SOS 03]. C'est au sein de cette équipe pluridisciplinaire qu'ont lieu les interactions, les communications, les transactions, les coopérations ou les collaborations particulièrement denses, directement utiles à un développement de qualité. L'apprentissage repéré au niveau de l'équipe pluridisciplinaire concerne la spécialisation sur un composant vu comme sous-système, la mise en œuvre locale de l'ingénierie système, l'intercompréhension entre métiers, ainsi que le perfectionnement dans l'amélioration de la capacité des processus locaux mis en œuvre par les acteurs de l'équipe considérée.

Au niveau « macroscopique » [MIC 03], l'entité collective qui peut être prise en compte pour mettre en exergue le caractère interdisciplinaire et collaboratif de l'ingénierie système est la communauté d'activité. D'une taille souvent étendue, celle-ci regroupe des professionnels qui produisent volontairement un savoir collectif de type opératoire [CEF 05]. Une telle communauté est un environnement coopératif au sens où ses membres ont une confiance réciproque [BOU 04]. Elle a vocation à regrouper, synthétiser et capitaliser des connaissances éparses [PRA 03], pour la transformer en connaissance instituée, c'est-à-dire générique et pérenne. Celle-ci est utile :

- d'un point de vue épistémique, pour définir quels sont les concepts à la base de l'ingénierie système ;
- d'un point de vue instrumental, pour la mettre en pratique et l'instrumenter ;
- d'un point de vue normatif, pour définir ce qui doit ou ne pas être fait dans cette mise en œuvre.

Comme le soulignent les différents théoriciens des communautés de pratique ou des communautés épistémiques [CEF 05], la connaissance instituée se construit par échanges, comparaisons, diffusion, généralisation, ou encore par la mise à l'épreuve d'idées, de concepts, de prototypes, proposés par les acteurs leaders de la communauté [BOU 04]. C'est ainsi cette communauté qui assure, pour ce qui nous concerne, le développement du référentiel normatif de l'ingénierie système, mais aussi de modèles associés, comme nous allons le voir maintenant.

### **6.4.3 La conception supportée par les modèles**

Concevoir un système-produit de façon complexe suppose une modalité de conception particulière, qui est la conception supportée par les modèles. Pour comprendre la nature et la portée d'une telle modalité, il convient de faire un historique très rapide de la conception. Il s'agit là d'une activité mettant en œuvre des aptitudes humaines communes, et donc de ce fait très anciennes [SIM 97, MIC 03, FOR 05]. L'Homme a conçu des objets techniques et mis en œuvre des processus bien avant que l'activité réalisée spontanément n'ait été rationalisée, c'est à dire identifiée, explicitée, théorisée, normalisée et instrumentée [PER 01, FOR 05]. L'historique de cette activité peut comprendre trois périodes.

Dans la « conception artisanale » [STA 00], la plus ancienne connue, l'artisan prend à la fois le rôle de concepteur et de producteur. Il connaît personnellement son client, et imagine et réalise de façon concourante une solution particulière, adaptée à un contexte opérationnel particulier [PER 01, MIC 03].

Dans la « conception empirique » [STA 00], le concepteur s'éloigne du fabricant, de l'utilisateur et du client. Il développe une solution en réalisant au plus tôt des prototypes physiques les plus réalistes possibles ou des plans les plus détaillés possible, et ajuste le contenu de son activité restante d'après les retours d'information auxquels donnent lieu ses réalisations [PER 01]. Dans cette modalité de conception, un test externe, venant du monde concret, est attendu pour valider un choix.

Dans la conception supportée par les modèles, l'exercice du concepteur devient abstrait. Celui est un pur « travailleur du savoir » [BOU 04] dont l'activité est initiée, réalisée et conclue par des modèles. Il construit et utilise le modèle à tous les moments de son plan d'action, que ce soit pour prescrire l'objet à venir, en préciser l'environnement, en décrire l'architecture, en simuler le comportement, le dimensionner. Il utilise aussi le modèle comme « objet intermédiaire » [MER 95], requis pour communiquer avec des tiers, pour prescrire une prestation, pour justifier un choix, pour valider un résultat, pour préciser un contrat, etc. De plus, le modèle comprend des variables clefs qui peuvent être informées d'après des données tirées de retours d'expérience : campagnes d'essais, usage effectif de la solution, etc. De la sorte, il lui devient possible d'internaliser les conditions de test. Au lieu d'attendre, comme dans la conception empirique, qu'un prototype ou qu'un plan réalistes soient produits pour décider si un choix de conception est satisfaisant ou non, le concepteur peut d'emblée fixer les variables critiques sur lesquelles portera le test et en borner ou en cibler les valeurs admissibles.

L'ingénierie système relève bel et bien de la conception supportée par les modèles, au sens où elle se focalise non sur la solution ou le projet particulier, mais sur des entités génériques que sont le système-produit et les processus de conception génériques. Pour ce faire, différentes techniques de modélisation peuvent être imaginées et utilisées. Les méthodes formelles, proches de celles utilisées en sciences de la nature depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, ne suffisent pas. Aussi des méthodes de modélisation propres au monde de l'ingénieur, du type des modèles blocs-diagrammes produits dès les années 1950 par les cybernéticiens [ARM 04], paraissent plus adaptées à une instrumentation générale de l'ingénierie système. De nos jours, l'archétype de ces méthodes est un langage « fonctionnel » [MOR 07] et diagrammatique pour l'ingénierie système, à savoir SysML (*Systems Modeling Language*) [SYS 06].

Le développement de SysML a été initié en 2001 par une communauté d'industriels rattachée à l'OMG (*Object Management Group*). SysML spécialise et étend UML, un langage lui aussi diagrammatique proposé par les informaticiens dans les années 1990 pour décrire le développement d'applications orientées objet [WIL 06]. À s'en tenir à la norme proposée fin 2006, SysML décrit le système-produit à l'aide de différents diagrammes, dont chacun décrit une vue spécialisée. Il n'existe pas de vue dominante ; la compréhension du système modélisé se faisant en les maillant (syn. diagrammes). Le concepteur navigue ainsi de l'une à l'autre, selon l'aspect du système-produit qu'il entend couramment traité.

Les quatre principaux types de diagrammes proposées par SysML décrivent les exigences du système-produit (*requirement diagram*), son comportement (*behavior diagram*), sa structure (*structure diagram*) et les relations paramétriques (*parametric diagram*). Ce qui correspond aux vues systémiques habituelles. Par ailleurs, l'approche objet qui sous-tend SysML garantit trois qualités de la modélisation systémique :

- la cohérence entre les vues (syn. diagrammes). Les objets, relations ou données déclarées dans un diagramme sont, lors du maillage et de la navigation, bien transférées dans les autres diagrammes ;
- l'intégration de différents niveaux de généralité. En utilisant les concepts de classe et d'héritage propres à la démarche objet, il est possible de décrire sous SysML aussi bien le système-produit, que ses solutions spécifiques ou individuelles. Il est aussi possible, dans une optique d'utilisation des connaissances capitalisées, de réutiliser les objets d'un processus à l'autre, par exemple d'un projet de conception d'un produit individuel à un autre projet relatif à un produit appartenant à une même famille ;
- l'interface avec les logiciels supportant les modèles analytiques. Il est possible d'exporter des données et des objets de SysML vers ces logiciels, pour que telle ou

telle équipe pluridisciplinaire, voire tel ou tel spécialiste, développe un modèle privé plus fin et plus précis, avant de réimporter les résultats ainsi obtenues dans le modèle SysML supportant le processus de conception complet, et ainsi en améliorer la validité analytique.

Par exemple, SysML propose, parmi les diagrammes de comportement, un diagramme pour décrire une machine à états finis (*State Machines*). L'automaticien, le fiabiliste, le programmeur d'automates en temps réel, etc., peut réutiliser les entités, les relations et les données du modèle SysML pour développer ses propres modèles, beaucoup plus précis et analytiques.

Les paragraphes précédents nous ont permis de donner un bref aperçu de l'ingénierie système. Celle-ci se focalise non sur la solution spécifique ou particulière, mais sur un objet abstrait appelé système-produit. Pour le comprendre, elle met en exergue son caractère artificiel, si bien que, pour elle, importe les concepts d'exigence, de fonction, de comportement, de contexte opérationnel, d'architecture, de famille, de solution, etc. L'ingénierie système propose aussi une vue générique de la conception complexe d'un tel système. Ce sont alors les concepts de processus, d'équipe pluridisciplinaire, de communauté, de modèle, dont SysML, qui peuvent être mis en avant. Il peut être utile de synthétiser les propos précédents en une représentation graphique concise et panoramique appelée ontologie.

### **6.5 L'ingénierie système, ontologie de la conception**

Dans la tradition philosophique grecque, l'ontologie décrit le discours raisonné (le *logos*) sur ce qui est (l'être). Lorsque nous avons affirmé que le système-produit est un artefact présentant à la fois certaines propriétés objectives (des fonctions, une architecture, des comportements) et conçu grâce à la combinaison de processus génériques, nous avons tenu des propos ontologiques, même si ceux-ci concernent non la réalité en général, mais une réalité technique, économique et organisationnelle bien précise. Ces propos ontologiques s'opposent à ceux, phénoménologiques, tenus en introduction, lorsqu'ont été évoquées les propriétés concrètes du téléphone portable.

Dans les années 1990, les informaticiens ont repris la notion philosophique d'ontologie pour nommer le premier modèle, concis et cohérent, qui peut être fait d'une réalité donnée ; la conception complexe de produits compliqués, dans le cas de l'ingénierie système. Ce modèle sémantique ne prend en compte que les éléments essentiels de ladite réalité [GRU 95]. Une telle ontologie comprend ainsi :

- des entités correspondant aux classes (donc aux espèces, familles, lignées, individus), aux propriétés ou aux événements ;
- des relations exprimant des liens épistémiques, d'appartenance, de propriété ou de causalité entre entités. Une flèche indique dans quel sens va la relation.

Reprenant les principes de modélisation évoqués ci-dessus, la figure 6.1 représente, en guise de conclusion à nos propos, une ontologie possible de l'ingénierie système. Des modèles plus précis, s'appuyant sur des langages plus formels, peuvent développer tel ou tel élément de cette ontologie. UML et les logiciels de modélisation de processus permettent de préciser l'architecture des processus génériques de l'ingénierie système [BON 06]. Les normes relatives au CMMI permettent de préciser ce qu'est la capacité d'un processus. L'architecture du système-produit ou de ses solutions peut être décrite à l'aide d'un diagramme de structure de SysML, voire encore plus finement avec des matrices structurelles de conception (DSM, *Design Structure Matrices*) [ULR 00], par exemple pour l'analyser dans le détail les interactions entre modules ou simuler la propagation des effets de telle ou telle nouvelle exigence sur l'ensemble du système [BON 08].

## 6.6 Conclusion

La complication croissante des objets techniques voulus, développés, produits et utilisés par l'Homme requiert un changement notable de « paradigme de la conception » [STA 00]. Ceux-ci ne peuvent plus être développés de façon empirique, mais de façon abstraite et complexe. Or, c'est précisément la vocation de l'ingénierie système que de permettre cette forme de conception. En effet, l'ingénierie système apporte un cadre de référence utile pour comprendre le périmètre et le contenu de la conception complexe de produits compliqués, et pour mettre en œuvre des organisations, des méthodes ou des outils (langage, logiciel, etc.) adaptés. Pour ce faire, elle se focalise non sur l'objet concret (la solution) ou le projet de conception particuliers, mais sur le système-produit et sur des processus génériques, requis par toute conception complexe. L'ingénierie système propose ainsi une gamme de concepts clefs, tels que ceux de contexte opérationnel, de fonction, de comportement, d'architecture, de partie prenante, d'exigence, de solution, de famille, de processus, d'équipe pluridisciplinaire, de modèle, etc. Tous peuvent être vus comme autant d'entités qu'il est possible d'agencer au sein d'un modèle appelé ontologie. Celle qui a été proposée étend un petit peu les ontologies développées par les normalisateurs de l'ingénierie système [AFI 04]. Pareille extension n'est que provisoire : la conceptualisation et la modélisation de et dans l'ingénierie système restant un vaste chantier.

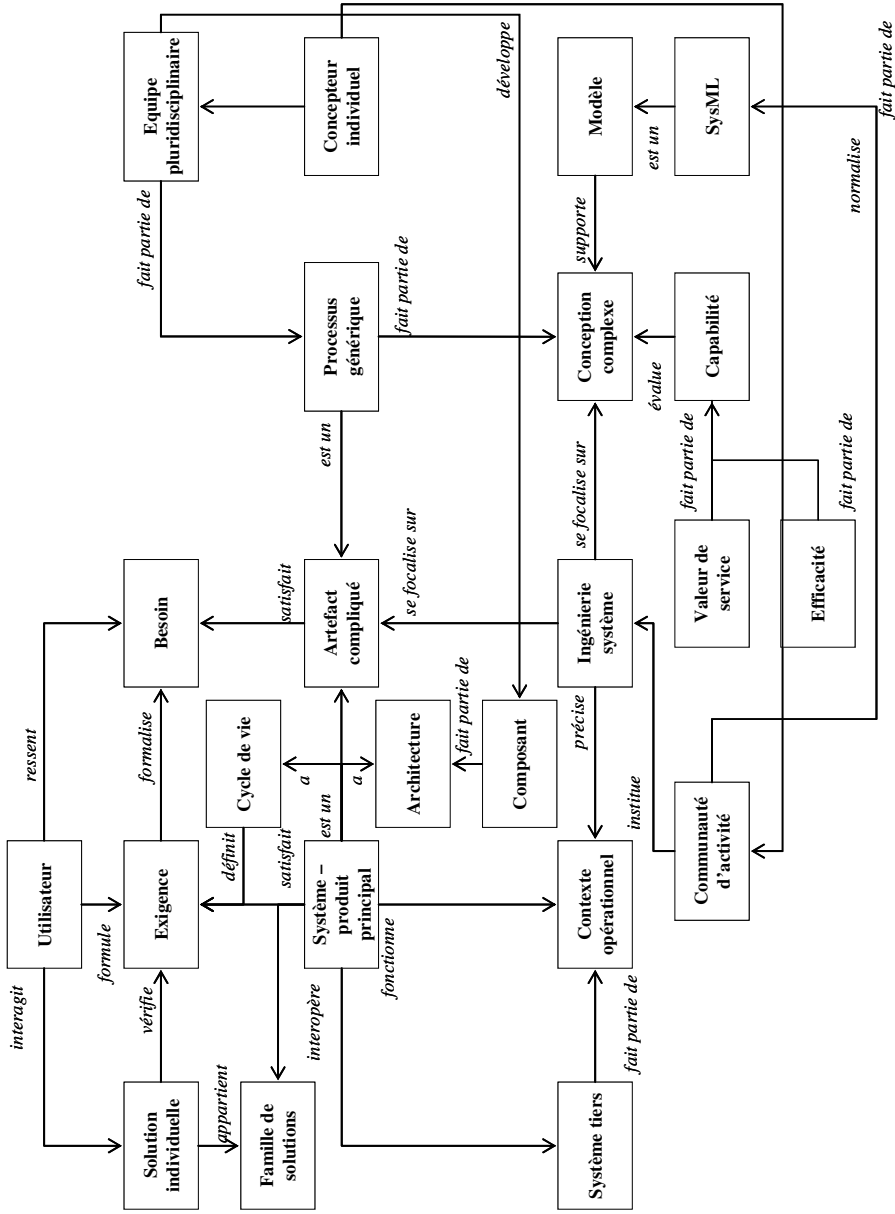


Figure 6.1. Une ontologie possible de l'ingénierie système

## Bibliographie

- [AFI 04] ASSOCIATION FRANÇAISE D'INGENIERIE SYSTEME (AFIS), Glossaire de Base de l'ingénierie système, AFIS, Paris, 2004, <http://www.afis.fr/doc/glossaire/glossaire.html>.
- [ARM 04] Armatte M., Dahan Dalmedico A., "Modèles et modélisation, 1950-2000", *Revue d'Histoire des Sciences*, 57(2), 2004, pp.243-304.
- [BON 06] BONJOUR E., DULMET M., "Pilotage des activités de conception par l'Ingénierie Système", in *Ingénierie de la Conception et cycle de vie du produit*, (sous la direction de ROUCOULES L.), Hermès, Paris, 2006, pp.85-105.
- [BON 08] Bonjour E., Harmel G., Micaëlli J-P., Dulmet M., "Simulating change propagation between product architecture and development organization", *International Journal of Product Development*, 2010, à venir.
- [BOU 04] Bouchez J-P., *Les Nouveaux travailleurs du savoir*, Les Éditions d'organisation, Paris, 2004.
- [CAR 06] CARLIER A., *Management de la qualité pour la maîtrise du SI: ITIL, SPiCE, CMMi, COBIT, ISO17799, BS 7799, MDA, Six Sigma et IT Gouvernance*, Hermès, Paris, 2006.
- [CEF 05] CENTRE FRANCOPHONE D'INFORMATISATION DES ORGANISATIONS (CEFRIO), Guide de Mise en place et d'animation de communautés de pratique intentionnelles : travailler, apprendre et collaborer en réseau, CEFRIO, Québec, 2005.
- [CHI 07] CHIOCCHIO S., MARTIN E., BARABASCHI P., BARTELS H-W., HOW J., SPEARS W., "System engineering and configuration management in ITER", *Fusion Engineering and Design*, 82(2007), pp.548-554.
- [FOR 05] FOREST J., Finalités, modalités et résultats d'une science de la conception, in *Pour une Science de la Conception: Fondements, méthodes, pratiques*, (sous la direction de FOREST J, MEHIER C., MICAËLLI J-P), Pôle éditorial de l'UTBM, Sévenans, 2005, pp.11-23.
- [GRU 95] GRUBER R-T., "Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing", *International Journal of Man-Computer Studies*, 43(1995), pp 907-928.
- [ISO 02] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO), ISO/IEC 15288:2002 Systems – System Life Cycle Processes Standard, IEEE, New York, 2005.
- [MEI 98] MEINADIER J-P., *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermès, Paris, 1998.



- [MER 95] MER S., JEANTET A., TICHKIEWITCH S., "Les objets intermédiaires de la conception, modélisation et coordination", in *Le Communicationnel pour concevoir*, (sous la direction de CAELEN J., ZREIK K.), Europia, Paris, 1995, pp.21-42.
- [MIC 03] MICAËLLI J-P., FOREST J., *Artificialisme : une introduction à une théorie de la conception*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2003.
- [MIC 08] MICAËLLI J-P., FOUGERES A-J., *L'Évaluation créative*, Pôle éditorial de l'UTBM, Sévenans, 2007.
- [MOL 72] MOLES A., *Théorie des objets*, Éditions Universitaires, Paris, 1972.
- [MOR 07] Morel C., *L'Enfer de l'information ordinaire*, Gallimard, Paris, 2007.
- [PER 01] PERRIN J., *Concevoir l'innovation industrielle : Méthodologie de conception de l'innovation*, CNRS Éditions, Paris, 2001.
- [PRA 03] PRAX J-Y., *Le Manuel du Knowledge Management*, Dunod, Paris, 2003.
- [SIM 58] SIMONDON G., *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, Paris, 1958.
- [SIM 97] SIMON H-A., *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, Cambridge (MA), 1997 (3<sup>e</sup> édition).
- [SOS 03] SOSA M., EPPINGER S., ROWLES C., "Identifying modular and integrative systems and their impact on design team interactions", *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, 125(2003), pp.240-252.
- [STA 00] STANKIEWICZ R., "The Concept of "Design Space"", in *Technological Innovation as an Evolutionary Process*, (sous la direction de ZIMAN J.), Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2000, pp.234-247.
- [SYS 06] SYSTEM MODELING LANGUAGE (SysML), OMG, SysML Adopted Specification, ptc/06-05-04, <http://www.omgsysml.org/#Specification>.
- [TES 07] TESSA E., PRONK T-E., PIMENTAL A-D., ROOSB M., BREIT T-M., Taking the example of computer systems engineering for the analysis of biological cell systems, *Biosystems* 90(2007), pp.623-635.
- [ULR 00] Ulrich K.T., Eppinger S.D., *Product Design and Development*, McGraw Hill, New York, 2000.
- [ULR 95] ULRICH K-T., "The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm", *Research Policy*, 24(1995), pp.419-440.
- [WHE 92] WHEELWRIGHT C, CLARK K.B., *Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency, and Quality*, The Free Press, New York, 1992.
- [WIL 06] WILLARD B., "UML for systems engineering", *Computer Standards & Interfaces*, 29(2007), pp.69-81.
- [YAN 08] YANNOU B., KANKOVIC M., NGUYEN VAN T., "Diversité industrielle de déploiement de projets de conception", in *La Conception industrielle de produits - Volume 2 : spécifications, déploiement et maîtrise des performances*, (sous la direction de YANNOU B., ROBIN V., CAMARGO M., MICAËLLI J-P., ROUCOULES L.), Hermès, Paris, 2008, pp.143-164.